

초전도체의 성질을 이용한 무손실 에너지의 가능성에 대한 연구

임 성 숙

영덕중학교, 경기도 수원시 443-809

들어가는 말

최근 지구온난화 등의 문제가 다시 부상하면서 현 에너지원인 석유를 대신할 수 있는 여러 대체에너지가 주목받고 있다. 대체에너지에 관심을 갖고 조사하던 중 아직 현실화되지는 않았지만 그 가능성이 무한한 초전도체와 연결되어 있음을 알게 되었다. 아직은 자기부상열차와 같은 가시적인 것으로만 알려져 있고 실용화가 전체적으로 이루어지고 있지는 않지만 노벨 수상자에서 많은 비중을 차지하는 것만 보아도 초전도체에 대한 연구는 중요하다.

이에 초전도체에 대한 이론을 조사하고 초전도체가 가지는 성질을 눈으로 확인하는 여러 실험을 하고자 하였다. 그리고 이를 이용, 초전도체의 활용 및 미래에 대해서도 탐구하던 중 초전도체에 의한 자기장 위에서 떠서 돌아가는 자석으로 전류를 만든다면 무한정으로 에너지를 저장하고 생산할 수 있지 않을까 하는 생각을 하였다.

그동안 연구했던 내용 중 초전도현상을 나타내는 임계온도 측정과 초전도현상을 일으키는 무손실 저장가능성에 대한 연구 과정을 소개하고자 한다.

- 가. 초전도체의 마이스너 효과에 미치는 영향에 대해 여러 가지 변인 요소를 주어 그 차이점을 조사한다.
- 나. 마이스너 효과로 생기는 역학적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 가능성을 알아본다.
- 다. 초전도체의 성질과 태양광 발전기 및 전동기와의 연결을 통해 에너지를 손실 없이 저장할 수 있는 가능성을 확인한다.

이론적 배경

초전도체는 초전도현상을 보이는 도체로 온도에 따라 크게 두 부류로 구별된다. 4.2 K의 액체헬륨 온도 근처에서 초전도 현상을 나타내는 것을 일반적으로 저온초전도체, 77 K의 액체 질소 온도 근처에서 초전도현상을 나타내는 것을 고온초전도체라 한다. 저온초전도체는 이미 오래 전에 발견된 Nb 및 Nb계 금속화합물, Chevrel상의 정팔면체 Mo착화합물 등이 있으며, 고온초전도체에는 최근에 발견된 4~5 원소로 구성된 산화물 형태의 세라믹으로 수십 여종이 있다. 그 중에서도 가장 높은 온도에서 초전도현상을 나타내는 초전도체는 아칸소(Arkansas) 대학의 헤르만 교수가 발견한 탈륨계(系) 초전도체이다. (김찬중, web site 참조)

정리하면 초전도체란 극저온에서 저항이 0이 되는 물질로 마이스너효과를 이용한다면 손실이 없이 에너지를 저장하거나 수송할 수 있으리라 기대된다. 마이스너 효과란 초전도체에 가해지는 자장을 상쇄시키는 방향으로 전류가 형성되어 흐르면서 가해진 자장을 밀쳐내는 성질이다. 이를 '반자성'이라고 하고 마이스너 효과를 다른 말로 '완전 반자성'이라고도 부른다. 이러한 성질 때문에 자석이 떠서 돌아가게 되어 마찰력이 없이 자기장을 변화시킬 수 있는 것이다.

그러나 상온에서 초전도성을 띠는 물체는 개발이 되지 않은 상태이므로 아직은 경제성이 부족하다. 재생 가능한 에너지 저장 장치에 대한 연구가 미래의 에너지문제 해결에 열쇠가 될 것이다.

가. 마이스너효과를 일으키는 임계온도

초전도 현상이란 전기저항이 0이 되는 현상(완전 전도성)이다. 전기저항이 0이 되면 에너지 손실 없이 전류가 흐른다. 단순히 저항이 없어지게 할 뿐만 아니라 초전도체 내부의 자기장

을 밖으로 밀어내는 현상이 있다. 초전도체 표면에 자장이 가해지면 초전도체에 가해지는 자장을 상쇄시키는 방향으로 전류가 형성되어 흐르면서 가해진 자장을 밀쳐낸다. 외부의 자기장의 반대방향으로 자기장을 만들어 서로 상쇄시키는 이 성질을 자기장 차폐라 한다.

우리나라에서 자주 쓰이는 초전도체에는 이트륨계 초전도체와 Mg-B의 초전도체가 있다.

초전도체를 얻을 수 있는 온도는 Mg-B의 초전도체가 이트륨(Yttrium, 원소기호 Y)계 보다는 저온이지만 순수한 초전도체를 얻을 수 있다는 장점이 있다. Mg-B의 초전도체는 병원이나 연구실 등에서 필요로 하는 순도가 높은 초전도체를 제작할 수 있는데 X-ray를 쏘여 나온 파동의 모양을 비교하여 순도를 조사할 수 있다. 성균관대학교 초전도연구실에서 제작한 초전도체를 가지고 실험하였다.

나. 임계온도의 변천과정

1911년에 수은으로 초전도성을 발견한 이래 초전도체의 초전도성을 발견한 임계온도를 높이는 노력이 계속 되었다. 표1과 그림1은 그 임계온도의 변천과정을 표로 나타낸 것이다. 이 표에서 볼 수 있는 것처럼 임계온도가 꾸준히 높아지고 있는데 이 임계온도가 높은 초전도체에 대한 개발이 경제성을 가져다 주리라는 것을 알 수 있다.

본 탐구에서는 최근에 많이 사용하고 있는 고온 초전도체인 이트륨계 초전도체와 Mg-B의 초전도체의 저장에 따른 온도관

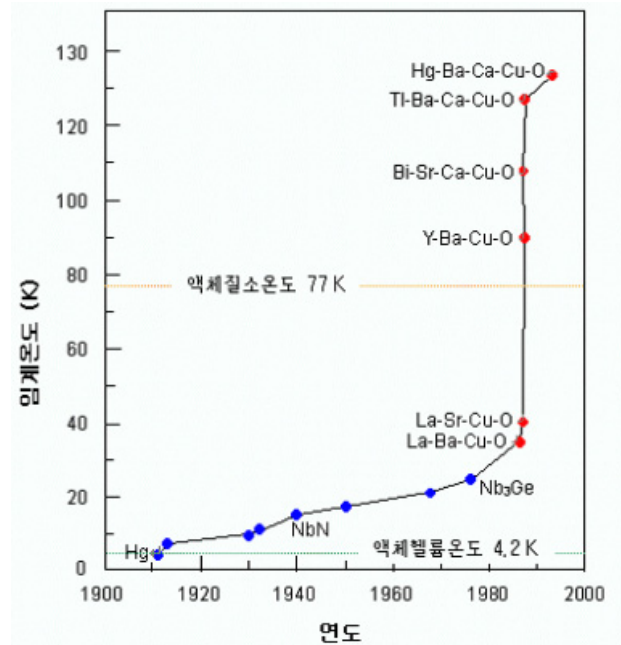


그림 1. 초전도체 임계 온도의 변천 과정.

계를 실험하여 그 임계온도를 측정하였다.

앞에서 이야기했듯이 저온초전도체는 4.2 K의 액체헬륨 온도 근처에서 고온초전도체는 77 K의 액체질소 온도 근처에서 초전도 현상을 나타내는 것을 알아내는 과정이다.

본고에서는 임계온도를 측정하는 방법을 개발하고 초전도 현상에 의한 마이스너효과에 의한 전자기유도 현상을 탐구하였다.

임계온도의 측정실험

우리가 사용한 초전도체는 이트륨계 초전도체로 임계온도를 측정하는 방법에 대해 고민하였다. 마이스너효과를 이용한 방법, 리드스위치를 이용한 방법으로 임계온도를 측정하였다.

가. 마이스너효과를 이용한 임계온도

초전도가 되었을 때 마이스너 현상이 나타나는 것을 이용, 마이스너 현상이 나타나는 순간의 온도를 측정하는 방법으로 임계온도를 측정하였다.

- (1) 샬레에 초전도체를 놓고 그 위에 자를, 자 위에는 영구자석을 올려놓는다.

표 1. 초전도체의 임계온도 변천과정

년도	소재	임계온도
1911년	수은	약 4.2 K
1925년	니오븀(Nb)(최초의 합금 초전도체 소재) 니오브티타늄(NbTi)(지금도 초전도체 소재로 가장 많이 쓰임)등의 합금	대체로 순금속보다 약간 높음
~1970 년대 중반	질화니오븀(NbN) 니오븀주석(Nb ₃ Sn) 니오븀게르마늄(Nb ₃ Ge)	16 K 18 K 23 K
1986년	세라믹 계열	30 K
1987년	산화물 계열	97 K
현재	희토류 산화물인 란타늄계 비스무스 산화물계 이트륨계 수은계	30 K 90 K 134 K 134 K



그림 2. 마이스너 현상을 이용한 임계온도측정.

- (2) 살레 안에 액체질소를 넣어 온도를 낮추면서 초전도체가 되어 마이스너 현상을 나타나는 순간의 온도를 측정한다.
- (3) 초전도현상을 일으키는 임계온도가 -188.9°C 가 됨을 알아내었다.

나. 리드 스위치를 이용한 임계온도 측정

리드 스위치는 리드(reed) 2매를 작은 유리관에 넣고 불활성 기체를 넣은 스위치이다. 리드 스위치 부근에 자석이 있으면 두 개의 리드가 붙어 ON 상태가 되는 것을 이용, 초전도성을 띠어 그 자기장이 차폐가 되면 불이 꺼지는 것을 알아보는 것이다. 즉 불이 꺼지는 순간, 초전도체가 초전도성을 띠게 되므로 불이 꺼지는 순간의 온도가 임계온도가 되는 것이다.

- (1) 리드 스위치와 LED, 건전지를 직렬로 연결한다.
- (2) 리드 스위치 근처에 영구자석을 놓아 그 영구자석에 의해 LED에 불이 들어오는 것을 확인한다.
- (3) 영구자석 앞에 냉각되지 않은 초전도체를 그 사이에 끼워 불이 계속 켜져 있음을 본다. 이로써 자기장이 차폐되지 않는 것을 안다.
- (4) 이 통에 액체질소를 넣어 초전도체를 냉각시킨다. 초전도체가 냉각됨에 따라 불이 꺼지는 순간을 알아볼 수 있다.
- (5) 불이 꺼지는 순간의 온도가 초전도체가 되는 임계 온도이다.



그림 3. 자기장 차폐에 임계온도측정.

- (6) 임계온도를 측정하여 비슷한 결과가 나온 것을 알 수 있었다.

다. 자기장 차폐 장치를 이용한 임계온도

앞에서 사용한 리드스위치를 이용하여, 좀 더 정량적으로 임계온도를 측정하기로 하였다. 우선 자기장차폐를 알아볼 수 있는 장치와 영구 자석을 넣을 수 있는 두 칸의 오픈형 아크릭 박스를 만들었다. 초전도체가 초전도성을 유지하는데 필요한 섭씨 -183°C 를 유지하기 위하여 액화질소를 이용하는데 이로 부터 리드 스위치를 보호하기 위하여 두 칸으로 나누었다.

리드 스위치로부터 영구자석의 위치를 조절하면서 램프를 켜줄 수 있는 위치에 부착한 후에 그 사이의 아크릴 칸에 고온인 상태의 초전도체를 넣는다. 계속 불이 켜져 있음을 볼 수 있다.

그 다음 초전도체 쪽에 액체질소를 부어 온도를 내려가도록 한다. 초전도체가 온도가 내려가면 자기장 차폐가 일어나 불이

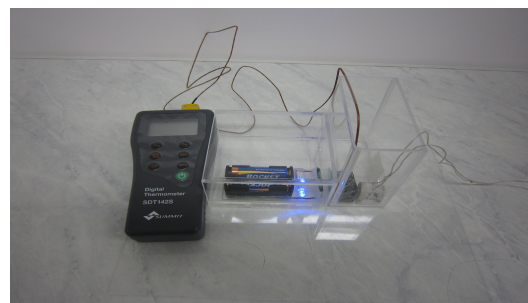


그림 4. 리드스위치 이용한 자기장 차폐장치.

꺼지게 되는데 이때 온도를 측정하면 이것이 임계온도가 된다.(2009경기도과학전람회 우수, 조수민)

라. 영구 자석과 초전도체 사이의 이물질을 끼워놓았을 때의 임계온도의 변화

초전도체와 영구 자석 사이에 전류가 흐르는 다양한 비자성체와 반자성체를 끼운 상태에서 임계온도에 차이가 있는지 실험하였다. 알루미늄 판, 플라스틱판, 구리 판 등으로 변화시키면서 실험을 해보았으나 섭씨 -183 ℃ 부근에서 초전도성을 띠는 성질에 별로 차이가 없었다. 이로부터 초전도체와 영구자석 사이에 전류가 흐르지 못하는 부도체를 끼워도 전류가 흐르는 현상을 예측할 수 있다.

이는 조셉슨 효과에 의한 것으로 두개의 초전도 물질 사이에 전기가 흐르지 않는 유전체를 끼어 넣어도 초 전류가 흐를 수 있는 것은 쿠퍼쌍이 이동하기 때문이다. 이것은 일종의 양자 터널 현상인데 쿠퍼쌍은 두개의 전자로 구성되므로, 각 쌍은 전자 전하의 두 배를 운반한다. 조셉슨 접합의 특징은 아주 작은 자기장도 감지할 수 있다는 것이다. 그것은 지구 자기장의 약 1천억 분의 1에 해당하는 10^{-15} T의 자기장도 측정할 수 있는 것이다.

마. 박편을 사용한 온도와 저항과의 관계

온도가 낮아지면 전류가 급격하게 흐른다는 것은 저항이 작아진다는 것이다. 그 정확한 관계를 알아보기 위해 초전도체를 박편을 내어 정밀하게 측정해보기로 하였다. 박편을 만들어 정밀한 결과를 얻기 위해 성균관대학교 초저온 연구실(강원남 교수)의 도움을 얻었다.

- (1) 이티륨계의 초전도체를 $0.5\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 정도의 박편으로 만들어 양 끝에 구리선을 두 개씩 붙여 전압, 전류계에 연결하였다.
- (2) 온도센서의 뒤 쪽에 초전도체를 붙인 후에 액체질소 속에 넣는다.
- (3) 온도가 낮아짐에 따라 전압과 전류값을 측정하여 온도에 따른 저항의 변화그래프를 얻는다.

위 실험을 통하여 온도에 따른 저항의 변화를 조사하였더니 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 온도가 낮아짐에 따라 저항이 작아지는데 그 작아지는 정도가 80 K와 105 K 부근에서

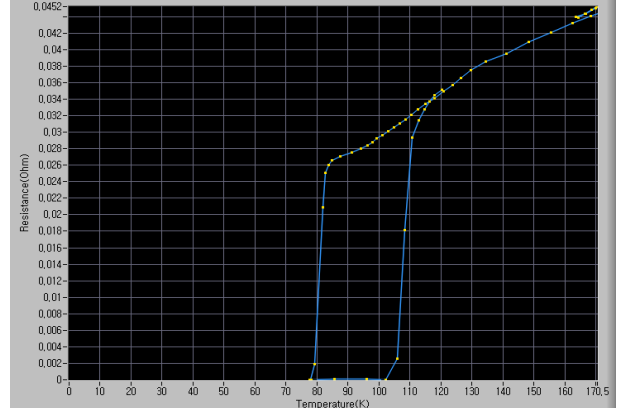


그림 5. 온도와 저항의 관계 그래프.

급격히 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 즉, 임계온도가 존재함을 알 수 있었다.

바. 초전도체 소재에 따른 임계온도

온도에 따른 저항의 관계그래프를 조사하여 저항이 급격하게 떨어지는 임계온도를 구할 수 있었다. 이티륨계 초전도체는 80 K에 가까워졌을 때 초전도성을 띠는데 반해 MgB_2 단선은

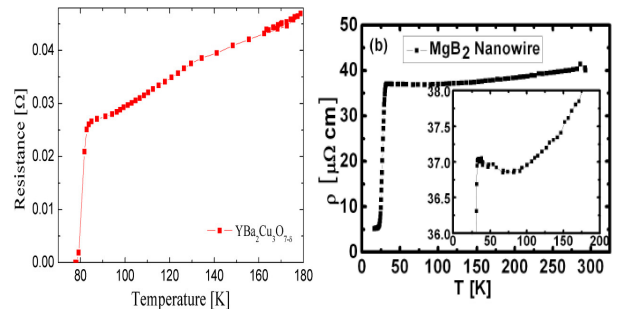


그림 6. 이티륨계와 MgB_2 나노선의 임계온도.

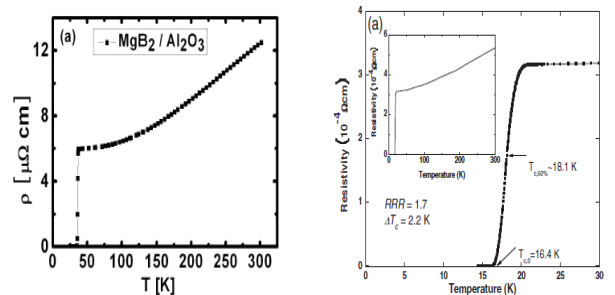


그림 7. LaAlO_3 에 Co-doped SrFe_2As_2 박막을 입힌 것과 $\text{MgB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 임계온도(Seong et al., 2007; Choi et al., 2009; Lee et al., 2009).

30 K, $\text{MgB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (사파이어에 MgB_2 박막을 입힌 것)은 40 K, LaAlO_3 에 Co-doped SrFe_2As_2 박막필름을 입힌 것은 16.4 K에서 초전도성을 띠었다.

온도를 낮추게 하는데 필요한 에너지를 생각하면 이터륨계가 가장 경제적이다. 하지만 순수결정이 필요한 경우의 의료 쪽 이용을 생각하면 박막으로 제작하는 것이 효과적이다.

이외에도 자기장을 차폐하는 성질을 이용하여 상대방의 레이다 망을 막을 수 있는 장치를 할 수 있는 항공기 등에도 이용된다.

전기에너지 산출 실험

초전도체의 마이스너 효과로 저항 없이 회전할 수 있는 역학적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 가능성을 알아보고자 하였다. 자기장의 변화가 있으면 유도전류가 생기는 전자기 유도현상을 이용하여 발전되는 전류의 양을 측정할 수 있는 발전장치를 제작하였다.

그림 8은 초전도체를 이용한 전기에너지 발생장치로 마이스너 효과에 의해 떠있는 영구자석이 돌아가면서 자기장의 변화를 일으키고 그 자기장의 변화로 유도전류가 생성되는지를 실험하였다.

우선 초전도체와 액체질소를 넣어 줄 용기를 스탠드에 고정시키고 그 아래에 영구자석을 매달아 마이스너 효과에 의해 떠 있을 수 있도록 한다. 그 아래에 유도전류가 생성되는지를 알려줄 LED 전구를 연결한다. 마이스너 효과에 의해 영구자석이 초전도체 아래에서 떠있도록 한 후 회전하게 하면 저항이 없으므로 잘 돌아간다. 이때 생기는 자기장의 변화에 의해 유도전류가 생성된다.

이 장치로 영구자석이 마이스너 효과에 의해 마찰이 없이 회전하게 되고 그 회전력에 의해 발전이 되는 과정을 눈으로 볼 수 있었다.

마이스너 효과에 의해 떠있는 자석을 수동으로 돌리게 하였더니 처음에는 전류의 양이 일정하게 나오지 않았다. 떠 있는 자석이 회전하는 것이 자기장의 변화로 나타나는 것은 아니기 때문이다. 자석 아래에 작은 자석을 달아 다시 같은 실험을 하였더니 발전되는 정도가 확인되었다. 그리고 돌아가는 모터의 전류계와 전압계를 연결해 초전도체에 의해 전기에너지가 저장되는 정도와 손실되는 정도를 구하여 발전량을 구하였다.

초전도체의 마이스너 효과에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위해 사용된 초전도체는 1개가 1.75 g으로 된 이터륨계 초전



그림 8. 마이스너효과에 의한 발전장치.

도체를 사용하여 액체질소의 양을 20 mL씩 사용하여 그 액체질소로 사용되는 시간으로 하였다.

그러한 조건에서 자석과 초전도체 사이의 물질 종류, 영구자석의 질량, 초전도체와 접촉한 면적, 초전도체의 질량 변화를 하면서 마이스너효과에 의해 생산되는 전기에너지를 측정하였다.

가. 물질의 종류에 따른 마이스너효과

초전도체와 영구자석 사이의 물질의 종류의 변화에 의해 마이스너 효과가 차이가 있는지를 알아보았다. 플라스틱 컵에 초전도체를 넣고 그 아래에 아크릴판, 구리판, 알루미늄 판을 끼워놓은 상태에서 자력냉각시켰다.(김찬중, web site 참조)

똑같이 20 mL의 액체질소를 사용하여 회전력을 유지하는 시간을 측정하여 비교하였다. 유지되는 시간은 비슷하였으나 도체인 구리판, 알루미늄 판이 부도체인 아크릴판 보다 좀 더 잘 돌아가는 것을 확인할 수 있었다.

실험장치의 초전도체에 동량의 액체질소 20 mL를 부어 자력냉각시키고 컵 아래에서 마찰력 없이 회전할 때 그 아래에 있는 코일에 흐르는 전류 값과 전압 값을 측정하였다. 그 값으로부터 초전도체 사이의 물질의 종류에 따라 달라지는 에너지를 구하였다.

그 실험결과는 표 2와 같다.

표 2. 물질의 종류에 따른 초전도성 유지 시간.

끼워 넣은 물질	아크릴판	구리판	알루미늄판
초전도성이 유지된 시간	9분08초	9분09초	9분10초



그림 9. 물질의 종류에 따른 마이스너효과.

그림 9는 물질의 종류에 따른 마이스너효과를 좀 더 정량적으로 측정하기 위해 초전도체를 넣은 컵 안에 알루미늄과 구리판, 플라스틱을 동그랗게 잘라 중간에 끼운 것과 알루미늄 컵 자체로 중간물질을 변화시키며 마이스너효과를 실험한 사진이다.

이 현상에 의해 자석이 회전하여 생긴 유도기전력을 비교하여 차이가 있는지를 실험하였다. 그 결과는 표 3과 같다.

이 표를 분석하면 초전도체와 영구자석 사이에 물질의 변화에 따라 에너지 값이 달라짐을 알 수 있다. 즉 초전도체를 담은 그릇의 종류에 따라 유도되는 기전력의 크기가 다름을 알 수 있다. 기전력의 크기는 다음 식에 대입하여 구한다.

$$\text{전기에너지} = \text{전압} \times \text{전류} \times \text{시간} = \text{전류}^2 \times \text{저항} \times \text{시간}$$

표 3. 물질변화에 따른 유도기전력.

초전도체와 영구자석 사이물질	전류 (mA)	저항 (kΩ)	전압 (μV)	에너지 값(μJ)
플라스틱	8	113.5	908	436
알루미늄	22	113.5	2497	3296
구리	32	113.5	3632	6973
알루미늄 컵	56	113.5	6356	21356

측정범위가 작은 최대값 2000 μA에서 유도전류를 측정하고 각 물질의 저항을 대입하여 구한다.

즉 초전도체와 영구자석 사이에 부도체를 중간에 끼워 놓은 경우는 종류를 변화시켜도 별 차이가 생기지 않는데 도체를 끼어놓은 경우 유도전류가 더 많이 생겨난다. 도체를 끼워놓으면 유도전류가 더 많이 생성되는 것은 코일의 감긴 수가 많으면 유도전류가 더 많이 생기는 것으로 해석할 수 있다. 전체가 알루미늄인 컵으로 실험했을 경우는 급격히 증가하는데 컵 자체가 도체로 작용하게 되어 유도전류가 많아짐을 알 수 있다.

플라스틱, 알루미늄, 구리의 순으로 유도기전력이 커지고 전체가 알루미늄 컵인 경우에는 유도전류가 갑자기 많이 생기는 성질을 이용하여 에너지를 저장, 또는 수송할 적에도 그 사이의 물질 종류에 따라 유도전류의 양을 변화시킬 수 있을 것이다.

나. 자석의 무게, 넓이와 마이스너효과

(1) 영구자석의 질량과 마이스너효과

그림 10과 같이 초전도체 아래의 질량이 5.7g인 영구자석의 개수를 변화시키고 거리는 1cm로 일정하게 한 상태에서 마이스너 효과가 나타나는 시간을 측정하였다. 액체질소의 양은 똑같이 20 mL로 하여 영구자석의 수(질량)에 따라 초전도성을 떠는 시간(자력냉각유지시간)에 대해 알아보았다. 즉 유도전류가 생성되는 시간을 측정하였다. 초전도체가 초전도성을 떠었을 때는 영구자석이 멈추지 않고 계속 돌지만 온도가 높아져 초전도성을 잃게 되면 아래로 떨어지는 것을 관찰할 수 있다.

실험 결과, 질량이 무거울수록 초전도성을 유지하는 시간이 짧아지기는 하지만 30초에서 38초 사이로 비슷하였다. 영구자석의 질량이 클수록 자기장의 변화가 크므로 유도전류가 많이 생성되므로 효율을 좋게 하려면 중력을 이기면서 떨어지지 않고 오래도록 머물 수 있는 질량을 알면 유리할 것이다.



그림 10. 영구자석의 질량변화에 따른 마이스너 효과.

(2) 영구자석의 면적과 마이스너효과

그림 11은 초전도체와 접촉하고 있는 영구자석의 면적과 마이스너 효과를 알아보는 실험이다. 초전도체 아래에 지름이 10, 25, 30, 50 mm 인 4가지 종류의 영구자석을 놓고 마이스너 현상이 나타나도록 하여 그 유지시간을 측정하였다. 이때 초전도체가 유지되게 할 수 있는 액체질소의 양은 20 mL로 일정하게 유지하였다.

이 실험으로부터 자석의 지름이 달라지면 유지되는 시간이 달라지는가를 알아보았다.

실험 결과, 초전도현상을 유지하는 시간에는 33-38초로 많은 변화가 없었으나 육안으로 확인되는 회전력은 지름이 클수록 빠르게 움직였다. 즉 접촉 면적이 넓을수록 초전도성을 오래 유지할 수 있고 질량은 작은 차이밖에는 없다는 것을 알 수 있었다. 즉 질량을 자력을 유지할 정도로 크게 하고 접촉 면적을 넓게 하면 동력을 더 효율적으로 산출할 수 있을 것이다.

다. 초전도체 질량 변화와 마이스너효과

초전도체의 질량을 변화시키면서 초전도현상을 관찰하였다. 그림 12는 초전도체의 질량을 변화시켜가며 마이스너 현상을



그림 12. 초전도체질량과 자력냉각 유지시간.

표 4. 초전도체 수량과 자력냉각 유지시간.

초전도체의 갯수	1개	2개	3개
자력냉각 유지시간	1분 36초	1분 59초	2분 11초

보이는 시간을 측정하는 그림이다. 이때 액체질소의 양은 20 mL로 60 초 동안 초전도체를 유지하면서 실험하였다.

초전도체의 질량변화에 따라 마이스너 현상을 나타내는 시간을 측정한 결과가 표 4이다. 초전도체의 개수(질량)에 따라 떠 있는 시간, 즉 초전도현상을 나타내는 시간이 길었다. 떠 있는 시간이 길면, 떠서 회전하게 되었을 때 전기를 저장 또는 생산할 수 있는 시간이 길어질 것이다.

이번에는 정량적으로 계산하기 위해 앞에서 제작한 실험 장치를 이용, 초전도체의 질량을 변화하였을 때 유도전류를 측정하여 보았다.

실험재료로 사용한 초전도체의 질량은 49 g과 54 g의 두 개를 사용하여 자력냉각 후에 초전도성의 유지 시간동안의 전류량을 측정한다. 이때 물질의 종류에 따라 초전도체 질량을 변화시켰다.

이때 초전도체와 영구자석 사이에 플라스틱, 알루미늄, 구리판을 끼워놓은 상태에서 초전도체의 질량을 변화시켰다. 각각의 경우에 얻어진 전류 값과 저항 값, 시간(60초)을 이용하여 에너지 값을 산출해보았다.

그림 13은 초전도체의 질량을 49 g, 54 g으로 한 실험이다. 이때 끼워진 물질을 변화시키면서 실험을 하였는데 그림 13-a는 끼워진 물질이 플라스틱, 그림13-b는 구리판, 그림 13-c는 알루미늄, 그림13-d는 알루미늄 컵을 놓고 초전도현상을 실험하는 모습이다. 그 결과는 표 5이다.

표에서 보는 것처럼 초전도체의 질량이 클수록 생산할 수 있는 에너지의 값이 커지는데 이때 커지는 폭은 초전도체와 영구자석 사이에 끼워진 물질의 종류에 따라 달라짐을 알 수 있었다.



그림 11. 지름이 다른 영구자석의 마이스너효과.

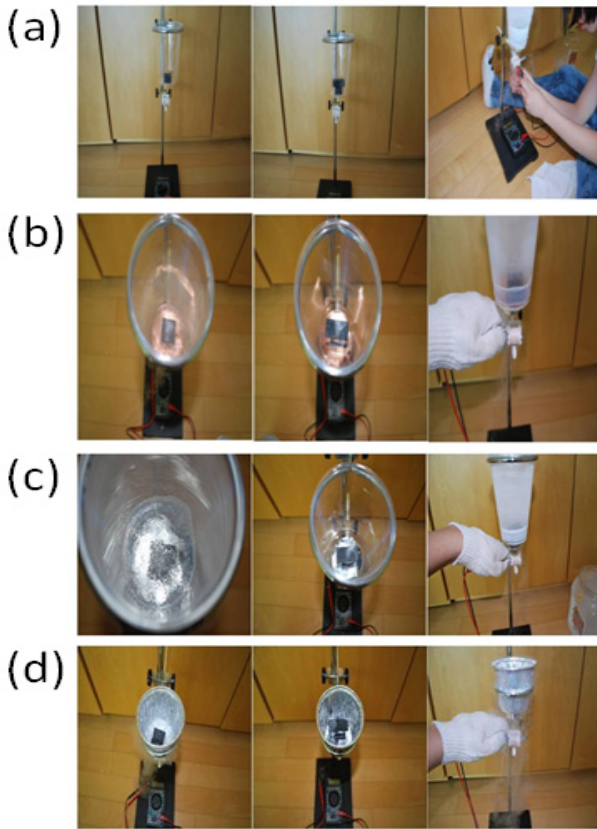


그림 13. 여러 물체에 의한 유도전류.

((a)플라스틱 (b)구리 (c)알루미늄 (d)알루미늄 컵)

표5를 분석하면 초전도체에 의한 발전 효율성을 높이는 방법을 생각할 수 있다.

아무것도 끼우지 않은 상태에서 초전도체 아래에 영구자석을 놓고 자력 냉각시키면 초전도체의 질량이 클수록 유도전류의 값이 커지는 것을 알 수 있다.

표 5. 끼여진 물질의 종류에 따른 에너지

끼워진 물질	초전도 질량 (g)	전류 (mA)	저항 (Ω)	전압 (μV)	에너지값 (μJ)
플라스틱	49	8	113.5	908	436
	103	14	113.5	1589	1335
알루미늄	49	22	113.5	2497	3296
	103	30	113.5	3405	6129
구리	49	32	113.5	3632	6973
	103	56	113.5	6356	21356
전체가 알루미늄 컵	49	56	113.5	6356	21356
	103	66	113.5	7491	29664

플라스틱, 알루미늄, 구리판을 끼운 경우 각각 모두 초전도체의 질량이 클수록 유도전류의 값이 커지기는 한다. 그러나 플라스틱일 때는 거의 차이가 나지 않고, 알루미늄 컵처럼 전체가 도체일 때 유도전류의 값이 가장 크다.

태양전지의 출력전압과 초전도성

가. 초전도체 전류저장장치

초전도에 의한 무손실 동력장치의 저장 가능성에 대해 알아보기 위해 3V의 출력전압을 낼 수 있는 태양전지를 연결하였다. 태양에너지에 의해 모터가 돌아가게 하여 그 회전력을 초전도현상을 나타나게 하는 영구자석에 연결하였다.

그림 15는 그 실험장치의 모식도와 실제 제작된 실험 장치이다. 태양에너지 셀에 의해 생산된 에너지로 모터가 돌아가고 그 모터의 축에 영구자석이 연결되도록 제작하였다. 그 회전에너지가 초전도체의 마이스너 효과에 의해 떠있게 되므로 저항이 없이 회전하게 되고 이 회전에너지에 의해 전기가 생산 또는 저장되게 되는 것이다.

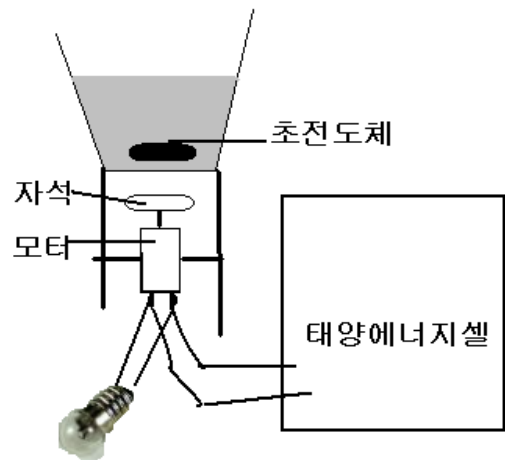


그림 15. 초전도체 저장 실험장치.

태양전지의 출력 전압 (V)	1.6	4.7	12.0
전력공급이 중지 된 상태의 영구자석이 회전한 수	7회	7.5회	8.5회

표 6. 출력 전압 변화와 영구자석의 회전수.

나. 초전도체의 저장가능성

태양전지의 전압 변화에 따른 초전도체의 저장가능성을 알아보기 위해 초전도체 전류저장장치를 이용하여 실험하였다.

태양전지의 전압을 변화시키면서 생산되는 역학적 에너지는 태양에너지에 의한 공급이 없는 순간에 0에 도달했다. 그러나 태양에너지로 생산된 역학적 에너지를 초전도체의 마찰 없는 회전현상을 이용하여 보다 효율적으로 저장함으로써 영구자석을 더 회전시킬 수 있었다.

이 회전능력이 태양에너지의 출력전압과 관계가 있는지를 실험한 결과는 표 6과 같다. 즉 출력전압을 크게 해주었다가 전압을 정지한 후 초전도체에 의해 더 돌아가게 되는 저장에너지가 태양전지의 출력 전압에 따라 회전수가 급격히 증가하지 않았다. 즉, 손실된 에너지가 많음을 알 수 있다.

이때 초전도체와 영구자석 사이의 물질이 도체일수록 유도전류가 많이 생성된다. 알루미늄 컵에 초전도체를 넣고 실험을 하면 유도전류가 많이 생성된다. 마이스너효과에 의해 영구자석이 떠있는 상태에서 회전하게 되면 저항 없이 돌 수 있다. 그리고 영구자석의 질량이 클수록 유도전류가 많이 생성되므로 마이스너현상을 유지할 수 있다. 또한 초전도체의 질량이 클수록 유도전류의 양이 많다. 초전도체의 무한 에너지 저장가능성을 알 수 있다.

결론 및 제언

초전도체로 된 물질의 위나 아래에서 마이스너 효과를 가지는 영구자석은 마찰이 없기 때문에 무한히 돌게 될 것이다. 저온인 상태를 유지하게 하여 초전도성을 잃지 않게 한다면 에너지 손실 없이 동력을 낼 수 있을 것이다.

마이스너 효과에 의한 역학적 에너지로 전기에너지를 생산, 저장의 효율성을 알아보기 위해 초전도체로 만드는 전기에너지 장치를 제작하여 탐구하였다. 초전도체를 자력냉각시 그 사이에 끼어 있는 물질의 종류, 영구자석의 무게와 넓이 변화, 초전도체와 접촉하고 있는 면적의 변화, 초전도체의 질량변화에 따

른 마이스너효과를 알아보았다. 실험결과 손실이 없이 전기를 저장, 수송의 가능성을 기대할 수 있다는 것을 알게 되었다. 요약하면 초전도체와 영구자석 사이의 물질이 도체일수록 유도전류가 많이 생성된다. 그리고 영구자석의 표면적이 넓을수록 유도전류가 많이 생성되고 질량에는 관계에는 큰 차이를 보이지 않는다.

그러한 사실을 이용하면 효율성이 좋은 발전방법을 연구할 수 있을 것이다. 또한 온도를 낮출 필요가 없는 달이나 우주여행 시에는 초전도성을 갖게 하는데 경제성을 가질 수 있다. 달은 공기도 없고 햇빛을 차단하면 40 K로 냉매가 없이도 초전도체를 사용될 수 있기 때문이다. 또한 초전도체는 핵융합에너지 연구개발 사업과 같은 곳에서 꼭 필요한 핵심 소재로 이에 대한 연구가 필요한 부분이 많다. 초전도현상의 연구로 이산화탄소 배출이 적으면서 무한하게 쓸 수 있는 태양광을 이용하여 그린에너지를 생산하고 이를 전기저항이 없는 초전도 재료(초전도 코일)를 이용하여 저장한다면, 전력 손실을 기존에 비해 훨씬 줄일 수 있을 것이다. 그러기 위해서 초전도체는 에너지 효율이 큰 동력원을 가질 수 있을 것이기에 계속적인 연구를 해야 할 것이다. 고온에서도 초전도성을 가질 수 있거나 온도를 낮은 상태로 유지할 수 있는 경제적인 방법을 연구하는 것이 필요할 것이다(이상영 외, 2006; 지안프랑코 비달리, 1996 참조).

참고 문헌

- 김건호, 장형전, 신나라 (2009) 초전도체 Magnetic Potential Well의 특성에 관한 연구. 과학전람회.
- 김제여자고등학교 (1993) 고온 초전도체를 이용한 응용기기 개발 연구. 과학전람회.
- 김찬중 <http://cafe.naver.com/supeconductor>.
- 이상영, 박은규, 한현경 (2006) MgB₂초전도체 박막에 대한 이온빔 조사가 MgB₂박막의 마이크로와 표면저항에 미치는 영향 연구. 과학기술부 보고서.
- 정우진, 고광수 (2005) 초전도체(YBa₂Cu₃O₇)세라믹 제작과 특성탐구. 과학전람회.
- 조수민 (2009) 초전도체 학습장치. 수원시 발명대회.
- 지안프랑코 비달리 (1996) 신비로운 초전도의 세계. 한승.
- Choi EM, Jung SG, Lee NH, Kwon YS, Kang WN, Kim DH, Jung MH, Lee SI, Sun L (2009) In situ fabrication of cobalt-doped SrFe₂As₂ thin films by using pulsed laser

deposition with excimer laser. Appl. Phys. Lett. 95(6): 062507.

Lee SG, Hong SH, Seong WK, Kang WN (2009) All focused ion beam fabricated MgB_2 inter-grain nanobridge dc SQUIDs. Supercond. Sci. Technol. 22: 064009.

Lee SG, Hong SH, Seong WK, Kang WN (2009) Josephson effects in weakly coupled MgB_2 intergrain nanobridges

prepared by focused ion beam. Appl. Phys. Lett. 95(20): 202504.

Seong WK, Huh JY, Jung SG, Kang WN, Lee HS, Choi EM, Lee SI (2007) Growth of superconducting MgB_2 thin films by using hybrid physical-chemical vapor deposition. J. Kor. Phys. Soc. 51(1): 174-177.